



INCORPORACION DE PAELOTERRREMOTOS EN CÁLCULOS DE PELIGROSIDAD SÍSMICA NO ZONIFICADOS

INCORPORATION OF PALEOEARTHQUAKES IN ZONELESS SEISMIC HAZARD CALCULATIONS

M.J. Crespo (1), J. Martí (2) y F. Martínez (3)

PRINCIPIA Ingenieros Consultores Calle Velázquez, 94, 28006 Madrid, Spain

- (1) maria.crespo@principia.es
- (2) joaquin.marti@principia.es
- (3) francisco.martinez@principia.es

Resumen: Las evaluaciones de la peligrosidad sísmica suelen apoyarse en la información del catálogo. El período de retorno de los cálculos probabilistas debe ser consistente con las tasas de ocurrencia representadas en la caracterización de la actividad. En la metodología de Gutenberg-Richter (GR) se fija una magnitud máxima de integración que acota la validez de la ley de GR, siendo frecuente que el rango cubierto por la ley de GR exceda al cubierto por el catálogo que la soporta. En un método no zonificado la tasa de actividad se construye a partir de los eventos del catálogo y es sólo representativa de dichos eventos, aunque la incorporación de incertidumbres y el adecuado manejo de los períodos efectivos pueden incrementar los períodos de retorno respecto al rango cubierto por el catálogo. Se expone aquí una estrategia para incorporar información paleosísmica en una metodología basada en estimadores de densidad kernel.

Palabras clave: peligrosidad sísmica, fallas, kernel, paleoterremotos

Abstract: The evaluation of the seismic hazard is usually based on information contained in the seismic catalogue. The return periods sought in a probabilistic calculation must be consistent with the event frequencies represented in the characterization of the seismic activity. In the Gutenberg-Richter (GR) methodology, the maximum magnitude adopted for integration bounds the range of validity of the GR law and it is not unusual that the range covered by the GR law exceeds that covered by the supporting catalogue. In zoneless methods the activity rate is constructed using the events in the catalogue and is therefore representative of those events only, though the incorporation of uncertainties and an adequate use of the effective periods allow increasing the return periods beyond the range covered by the catalogue. A strategy is presented here to incorporate paleoseismic information in a methodology based on kernel density estimators.

Key words: seismic hazard, faults, kernel, paleoearthquakes

Los cálculos de peligrosidad sísmica suelen tener como fuente principal de información el catálogo sísmico. Este catálogo tiene una cierta extensión, en el espacio y en el tiempo, y con un cierto grado de completitud que es necesario identificar. La metodología tradicional conocida comúnmente como método zonificado de Cornell-McGuire comienza por identificar las fuentes sismogénicas: si se conocen las fallas, se pueden modelizar como tales con su geometría y su capacidad de generación sísmica y, en el caso de no poderse identificar una correspondencia entre sismos y fallas, la capacidad de generación de terremotos se asigna a una serie de áreas o zonas a las que se asigna una capacidad uniforme de generación de terremotos. Este segundo caso es el más habitual en zonas de sismicidad media-baja, como es la Península Ibérica. La capacidad de generación de las zonas se representa mediante una función analítica, la ley de Gutenberg-Richter, que se ajusta con los sismos del catálogo, si bien su rango de validez, en particular el que tiene que ver con la magnitud máxima, se sitúa en general por encima del rango cubierto por las magnitudes del catálogo; en algunos casos esta magnitud se determina con criterios geológicos o de paleosismicidad y en otros se adoptan criterios como incrementar una cierta cantidad la magnitud máxima registrada.

En el contexto de una metodología no zonificada basada en estimadores de densidad kernel, en la que la tasa de actividad se construye a partir de los eventos del catálogo, el rango de definición de la tasa de actividad sísmica construida sí que coincidirá con el de los eventos del catálogo.

El objeto del ejercicio es generalmente determinar la acción sísmica a emplear en un diseño estructural. En los contextos más modernos de diseño, se considerarán diferentes probabilidades de ocurrencia asociadas a distintos niveles de prestación. Para estructuras convencionales, resulta habitual un nivel de probabilidad del 10% en 50 años, o su equivalente de 475 años de período de retorno; las normativas convencionales pueden incluso llegar a considerar una probabilidad menor, por ejemplo 5% en 50 años, o sus correspondientes 1000 años de período de retorno. Ahora bien, en construcciones especiales como pueden ser las propias de la industria del gas o la nuclear, resulta habitual el trabajar con períodos de retorno de 2.475, 4.975, 10.000 o incluso 100.000 años.

Surge aquí la cuestión de hasta qué punto resulta razonable ofrecer resultados para períodos de retorno que exceden ampliamente el espacio temporal cubierto por el catálogo. El catálogo instrumental cubrirá un siglo en el mejor de los casos; el período cubierto por el catálogo histórico es

más variable según las zonas, pero en ningún caso será suficientemente extenso como para incluir varias ocurrencias de eventos con frecuencia temporal media acorde con los períodos de retorno mencionados en el párrafo anterior.

Una modelización con zonas puede completarse con fallas en las áreas en que se disponga de información; para la caracterización de estas fallas surgió primeramente el modelo del terremoto característico (Schwartz and Coppersmith, 1984) en el que se considera que la falla puede generar terremotos dentro de un rango, siendo de mayor frecuencia en torno a una cierta magnitud; y el modelo del terremoto máximo (Wesnousky et al., 1993) que supone que una cierta magnitud es la única susceptible de producirse en la falla. Cualquiera que sea el modelo, en el caso de combinar la modelización de fallas con zonas sismogénicas, se ha de prestar especial atención a los límites de integración de unas y otras con objeto de garantizar que no se contabiliza dos veces una misma tasa de actividad. Para el caso de España, recientemente se ha presentado el trabajo de Rivas (2014).

En el contexto de una metodología sin zonas como la propuesta por Woo (1996) con funciones kernel, la tasa de actividad sísmica λ_k , es dependiente de la magnitud M y de la posición \mathbf{x} y se construye de la siguiente forma:

$$\lambda_k(\mathbf{x}, M) = \frac{1}{H(M)^2} \sum_{i=1}^n \frac{K\left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{H(M)}\right)}{T(\mathbf{x}_i)}$$

Se trata de un sumatorio de funciones kernel K situadas sobre cada evento del catálogo con posición \mathbf{x}_i y ponderadas con un período efectivo $T(\mathbf{x}_i)$; el resultado es función de la posición y la magnitud de forma continua pero no de una forma predefinida. El ancho de banda $H(M)$ depende de la magnitud. El trabajo de Crespo et al. (2013) incluye una descripción más amplia de esta formulación.

La función kernel K es una función densidad de probabilidad, unitaria, definida sobre un espacio bidimensional. En su definición más simple presenta simetría axial, pero admite un cierto esvía en una dirección.

Las funciones kernel esviadas suelen tener dos parámetros adicionales para controlar por una lado la orientación del eje principal de la proyección en planta de la función, y por otro el ratio entre las distancias mayor y menor cubiertas por el kernel en direcciones perpendiculares. Una forma simple de conseguir el esvía es la de multiplicar la formulación axisimétrica por una función; así es por ejemplo la función kernel de tipo inverso bicuadrática que tiene la siguiente expresión en su versión axisimétrica:

$$K_{axi}(r) = \frac{n-1}{\pi H^2} \left[1 + \left(\frac{r}{H} \right)^2 \right]^{-n}$$

donde: n es un exponente de caída

H es el ancho de banda

y en su versión direccional una posible formulación, que por ejemplo propone Gordon Woo es:

$$K_{dir}(r, \Theta) = K_{axi}(r) \frac{1}{1 + \frac{DL}{2}} \left[1 + DL(\cos(\Theta))^2 \right]$$

donde: DL describe el grado de anisotropía

T controla la orientación de esa anisotropía

Esta formulación tiene la ventaja de desacoplar en dos funciones independientes el tamaño del kernel y su anisotropía, aunque presenta la desventaja de no estar definida en el origen. La Figura 1 muestra un esquema cualitativo de un kernel isótropo y otro anisótropo según la formulación presentada. Los autores están trabajando en la actualidad con formulaciones basadas en una proyección elíptica, lo que evita la singularidad.

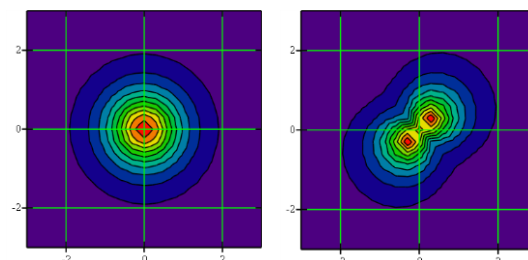


Figura 1 Funciones kernel sin y con anisotropía
Figure 1 Kernel functions with and without anisotropy

En los casos en que la función kernel se coloca sobre terremotos sin falla identificada lo habitual es mantener la simetría axial del kernel.

Para los terremotos del catálogo en que se conoce la falla que los originó, se puede definir una función kernel con la densidad de actividad concentrada en la dirección de la falla. Cabe señalar que en esta metodología, aunque no se orienten las funciones kernel, aparece de manera natural una mayor tasa de actividad en torno a ciertas fallas, debido a la mayor concentración de terremotos generados, efecto que se puede acentuar con una adecuada orientación de las funciones kernel.

Como se ha visto en la función anterior, cada terremoto tiene además un período efectivo propio. Estos períodos efectivos pueden asignarse de manera general en función de la magnitud o ubicación del evento, o también pueden asignarse de manera particular según las características del sismo. En el caso de tratarse de un evento cuya magnitud es la magnitud característica asociada a la falla, este período efectivo debería ser el período de recurrencia que se estima para dicho terremoto. El período efectivo se debería estimar con estudios paleosísmicos y puede resultar ser un valor superior al período de tiempo cubierto por el catálogo: es decir, en el tiempo abarcado por el catálogo es posible que no haya habido más de una ocurrencia de un sismo de tales características, y su período de recurrencia puede exceder el tiempo cubierto por el catálogo; en estos casos la tasa de actividad así representada puede ser adecuada para un periodo

de retorno mayor que lo que aconsejaría a primera vista el espacio de tiempo cubierto por el catálogo.

De la misma forma que se puede dar un tratamiento particular a la función kernel y al período efectivo para los eventos del catálogo, también se pueden añadir al catálogo nuevos eventos, particularizados para que representen una sismicidad que no está reflejada en el catálogo pero que se sabe de ella a través de estudios de paleosismicidad.

Tomando como referencia los dos modelos más conocidos en la actualidad para la caracterización de fallas en estudios de peligrosidad, Schwartz and Coppersmith (1984) o Wesnousky et al. (1993), ambos tendrían aquí equivalentes naturales. Si además de un magnitud predominante, la falla tiene asociada también sismicidad asociada a bajas magnitudes, es de esperar que esté recogida en el catálogo sísmico y por lo tanto aparecerá representada con las funciones kernel posicionadas sobre los eventos del catálogo. Si por el contrario la falla sólo generara terremotos en torno a una magnitud, no habrá terremotos en el catálogo para representar dicha sismicidad y únicamente se modelizará la tasa de actividad asociada a la magnitud propia de la falla, bien a través de algún terremoto ya existente en el catálogo o mediante la adición de los terremotos adecuados.

Las características de los terremotos que se añaden al catálogo en representación de la sismicidad deducida por métodos paleosísmicos se detallan a continuación, siguiendo la nomenclatura de la fórmula anterior:

- Posición del epicentro x_i , centrada en la traza de la falla, o en el caso de ser una falla de grandes dimensiones con una proyección en superficie muy alargada, se podrían colocar varios eventos a lo largo de la traza de la falla.
- Magnitud M , la característica de la falla. Es necesario asignar asimismo una incertidumbre a esta magnitud, la cual se tiene en cuenta en el cálculo como incertidumbre de tipo aleatorio al construir la tasa de actividad para diferentes magnitudes.
- Período efectivo T igual al período de recurrencia concluido para la falla. Si se ha optado por colocar varios terremotos, el período efectivo sería igual al período de recurrencia multiplicado por el número de eventos; será el mismo para todos los eventos. De esta forma se consigue que la suma de las contribuciones de todos los sismos esté ponderada por el período de recurrencia.
- Ancho de banda H , su dimensión debería ser del orden del ancho de la proyección de la falla en superficie, si bien tiene cierta dependencia del tipo de función kernel que se emplee.

En el caso de que la falla esté definida por varios tramos de diferente orientación, se puede representar cada uno de ellos con un sismo cuya función kernel asociada tenga la orientación adecuada. Resulta frecuente en estos casos el que se plantee más de una hipótesis en las conclusiones del estudio de paleosismicidad: una única falla con una cierta magnitud característica o varios tramos

que se comportan en la práctica como fallas diferentes. Cualquiera que sea la situación puede representarse con el debido número de terremotos adecuadamente caracterizados.

La metodología sin zonas basada en una estimación de densidad no paramétrica, en este caso nos hemos referido a la basada en funciones kernel, permite integrar con facilidad y gran versatilidad la actividad sísmica obtenida a partir de estudios paleosísmicos, ya sea identificando sismos en el catálogo asociados a fallas conocidas o añadiendo nuevos eventos. En uno y otro caso, se necesita la geometría de la falla, su magnitud característica y el período de recurrencia.

Al mismo tiempo, para generar el deseado input para la ingeniería, conviene valorar hasta qué punto las alternativas (zona distribuida, multitud de fallas independientes) conllevan diferencias en la solución. De hecho, probablemente sea razonable diferenciar distintas zonas, en función de su distancia al emplazamiento como se indica en algunas guías o normas específicas de ciertas industrias, como es el caso por ejemplo de la guía SSG-9 (IAEA, 2010).

Se presenta a continuación una aplicación de la metodología expuesta a un emplazamiento en la costa del Pacífico del Canal de Panamá. En este caso el catálogo sísmico comenzaba con registros de mediados del s. XVI, sin embargo presenta grandes carencias de completitud hasta el s. XIX.

Cerca del emplazamiento existen 4 fallas que se consideran activas y cuyo estudio paleosísmico concluyó los parámetros indicados en la Tabla 1, a tener en cuenta en el cálculo de peligrosidad.

Se trata de cuatro fallas de desgarre situadas todas ellas a menos de 50 km de emplazamiento estudiado. Las fallas no fueron objeto de estudio en el trabajo, sino que sus parámetros venían dados por un estudio previo, incorporado como dato de partida. La traza de las fallas se muestra en la Figura 2.

Falla	Magnitud caract. (M_w)	Incertidumbre de la magnitud	Período de recurrencia (años)
Azota	6.7	0.3	600
Limon	6.7	0.2	400
Pedro Miguel	6.9	0.2	450
Gatun	6.7	0.2	150

Tabla 1 Caracterización de las fallas a incluir en el cálculo
Table 1 Characterisation of the faults to be considered

Al no estar reflejada en el catálogo la sismicidad asociada a las fallas citadas, se procedió a añadir eventos al catálogo sísmico de acuerdo con las características de la Tabla 1. Puesto que se trata de fallas de una longitud importante y con más de un tramo rectilíneo, se optó por representar cada una con varios terremotos, situados en el centro de los diferentes tramos: se emplearon dos terremotos para la falla de Azota, dos para la falla Limón, tres para la falla Pedro Miguel y cinco para la falla Gatun. Como se comentó anteriormente, se tuvo en cuenta este hecho en la asignación de períodos efectivos a cada de sismo.

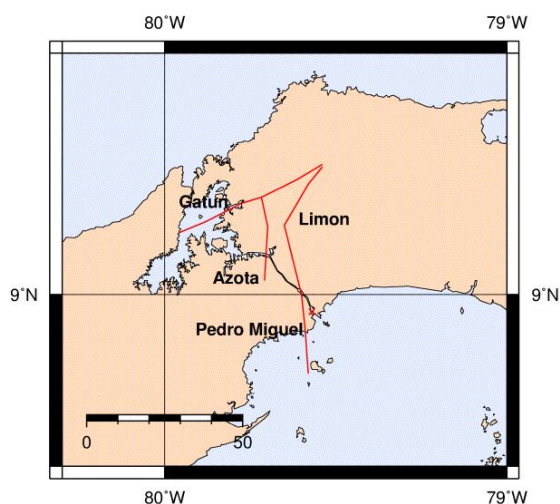


Figura 2 Fallas en torno al emplazamiento.
Figure 2 Faults around the site.

El estudio de peligrosidad trató por separado la sismicidad proveniente de los terremotos del catálogo, distinguiendo a su vez entre terremotos superficiales y profundos, de la asociada a estas cuatro fallas.

La curva de peligrosidad resultante para la PGA se muestra en la Figura 3. En esta misma figura se muestran las curvas de peligrosidad procedentes de la sismicidad superficial del catálogo, la sismicidad profunda y la sismicidad deducida por métodos paleosísmicos. Como puede apreciarse, para bajos períodos de retorno, la peligrosidad proveniente de los terremotos superficiales es la más importante, seguida por la de las fallas y, por último, la de los terremotos profundos. A partir de un período de retorno de unos 400 años, la peligrosidad pasa a estar dominada por la sismicidad asociada a las fallas. Esta observación es coherente con los períodos de recurrencia indicados en la Tabla 1.

Tras la exposición metodológica realizada y el ejemplo práctico de aplicación presentado, pueden establecerse algunas ideas a modo de conclusiones:

- En los estudios de peligrosidad sísmica debe valorarse la necesidad de incluir información paleosísmica, teniendo en cuenta los niveles de probabilidad buscados y las características del catálogo disponible.
- La metodología sin zonas, basada en una estimación de una densidad no paramétrica a partir de los eventos sísmicos registrados, permite integrar de forma fácil y versátil la actividad sísmica obtenida a partir de estudios paleosísmicos mediante la adición de eventos al catálogo sísmico.

- Conviene evaluar el impacto que conlleva la inclusión de fallas en el resultado final, siendo probablemente razonable diferenciar distintas zonas en función de su distancia al emplazamiento.

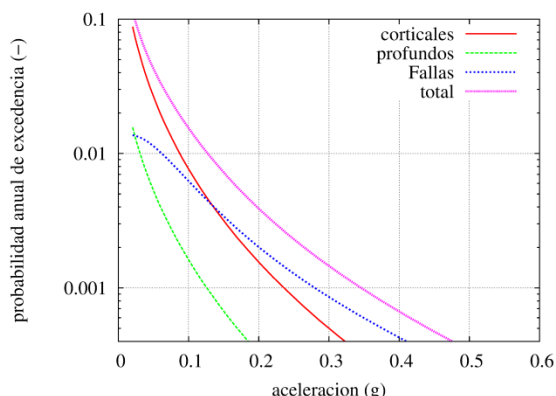


Figura 3 Curvas de peligrosidad.
Figure 3 Hazard curves.

Referencias bibliográficas

- Crespo M.J., Martínez, F., and Martí, J. (2014) *Seismic Hazard of the Iberian Peninsula: Evaluation with Kernel Functions*, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 14.
www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/14/1309/2014/
- IAEA – International Atomic Energy Agency (2010) *Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*, Safety Standards Series No. SSG-9.
- Rivas (2014) *Contribución Metodológica para Incorporar Fallas Activas en la Modelización de la Fuente Dirigida a Estimaciones de Peligrosidad Sísmica. Aplicación al Sur de España*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Schwartz, D.P. and Coppersmith, K.J. (1984) *Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones*, Journal of Geophysical Research, Vol. 89.
- Youngs, R.R., et al. *A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA)*, Earthquake Spectra, Vol.19, No.1, 2003, pp.191-219.
- Wesnowsky, S.G., Scholz, C.H., Shimazaki, K., and Matsuda, T. (1983). *Earthquake Frequency Distribution and the Mechanics of Faulting*, Journal of Geophysical Research, Vol. 88.
- Woo, G. (1996) *Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Modelling*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86.